THÈME 5 : SYSTEMES TRIPHASES EQUILIBRES

SOMMAIRE

Page

Séquence 1 : Réseau triphasé

I. Introduction aux systèmes triphasés……4

II. Systèmes triphasés équilibrés……...4

II-1- définitions……..4

II-2- Installations triphasées 5

II-2-1 Présentation du réseau triphasé basse tension 5

II-2-2- Tensions simples 6

a- Définitions..... 6

b- Equations horaires des tensions simples..... 6

c- Oscillogrammes..... 6

d- Représentation vectorielle associée 7

II-2-3- Tensions composées..... 7

a- Définitions..... 7

b- Représentation vectorielle associée 7

c- Oscillogrammes..... 7

d- Equations horaires des tensions composées..... 8

II-2-4- Relation entre U et V..... 8

II-2-5- Identification d'un réseau triphasé..... 8

Séquence 2 : Moteurs asynchrones triphasés

I- Introduction 9

II- Présentation..... 9

II-1- Constitution 9

II-1-1- Le stator 9

II-1-2- Le rotor..... 10

II-2- Principe de fonctionnement 10

II-3- Glissement 11

II-4- Symboles..... 11

II-5- Modélisation 11
III- Plaque à bornes et couplage 12
III-1- Plaque à bornes 12
III-2- Couplage des enroulements 12
III-2-1- Couple étoile 12
III-2-2- Couple triangle 12
III-2-3- Inversion du sens de rotation 13
IV- Puissances mises en jeu en triphasé 13
IV-1- Puissance active (P) 13
IV-2- Puissance réactive (Q) 14
IV-3- Puissance apparente (S) 14
IV-4- Triangle de puissances 14
IV-5- Mesure des puissances 15
IV-5-1- Le wattmètre 15
IV-5-2- Mesure de la puissance active par la méthode d'un seul wattmètre 15
IV-5-3- Mesure des puissances par la méthode de deux wattmètres 15
V- Plaque signalétique 16
VI- Bilan de puissances 17
VI-1- Puissances mises en jeu d'un moteur asynchrone triphasé 17
VI-2- Couples 19
VI-3- Rendement 19
VII- Fonctionnement à vide et en charge des moteurs asynchrones triphasés 19
VII-1- Fonctionnement à vide 19
VII-2- Fonctionnement en charge 20
VIII- Caractéristiques 20
VIII-1- Caractéristique électromécanique I=f(n) 20
VIII-2- Caractéristique mécanique Tu=f(n) 20
VIII-3- Point de fonctionnement 21
IX- Commande et protection 22
IX-1- Appareils d'isolement, de commande, de protection et de signalisation 22
IX-2- Constitution de l'installation d'un moteur asynchrone triphasé 24
IX-3- Démarrage direct 25
IX-3-1- Principe 25

IX-3-2- Démarrage direct à un seul sens de marche 25
IX-3-3- Démarrage direct à deux sens de marche 26
IX-4- Limitaion du courant de démarrage 27
IX-5- Démarrage étoile-triangle à un seul sens de marche 27
IX-5-1- Principe 27
IX-5-2- Schémas du circuit de puissance et du circuit de commande 28
IX-5-3- Fonctionnement 28
IX-5-4- Caractéristiques 29
IX-5-5- Avantages et inconvenients du démarrage étoile-triangle 29

THÈME 5 : SYSTEMES TRIPHASES EQUILIBRES
Séquence 1 : Réseau triphasé

I- Introduction aux systèmes triphasés.

La production d'énergie électrique se fait à partir de différentes sources d'énergies fossiles (charbon, gaz naturel ou pétrole), d'énergie hydraulique, d'énergie éolienne, d'énergie thermique, d'énergie nucléaire et aussi à partir d'une source solaire (panneaux photovoltaïques).

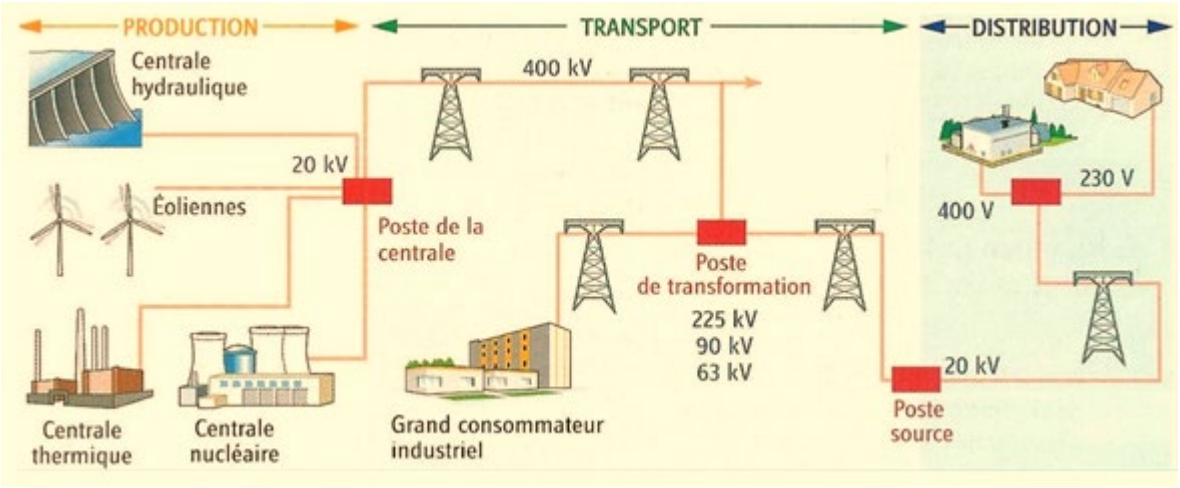


Figure 1

Intérêt du système triphasé par rapport au système monophasé

Figure 2

- Lors du transport de l'énergie électrique, les pertes sont moindres en triphasé. Pour ces raisons, la distribution de l'électricité (de la centrale vers les consommateurs) se fait à partir de quatre lignes. Trois lignes de phases et une ligne neutre.

Le fil neutre n'est pas distribué (peut ne pas exister) systématiquement.
Le réseau peut donc se présenter (exister) sous la forme de trois fils de phases uniquement.

- Les machines triphasées ont des puissances 50% supérieures aux machines monophasées de même taille, donc leur coût est inférieur.

II- Systèmes triphasés équilibrés.

II-1- Définitions.

Le **triphasé** est un **système** de trois tensions sinusoïdales de même fréquence, déphasées les unes par rapport aux autres.
Le système triphasé est équilibré si les tensions (courants) sont déphasées les unes par rapport aux autres de $2\pi/3$ et si elles ont la même valeur efficace.

II-2- Installations triphasées

Une installation triphasée contient essentiellement :

- Un réseau triphasé : C'est une source de trois tensions formant un système triphasé équilibré.
- Un récepteur : C'est une charge formée de trois impédances identiques (si le système est équilibré).
- Des lignes de liaisons.

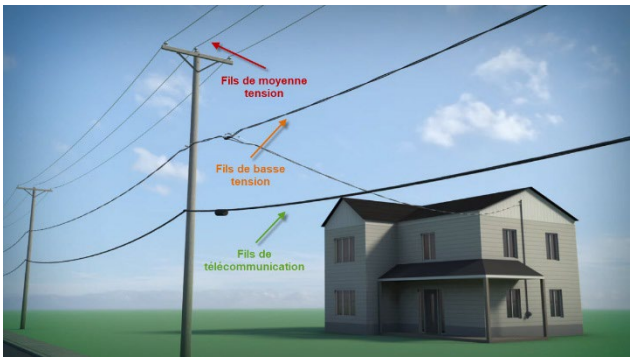


Figure 3

→ Le réseau triphasé basse tension (BT) est distribué par des lignes enterrées ou aériennes.

Figure 4

→ Le réseau triphasé BT est disponible en sortie des postes MT/BT préfabriqués ou aériens.

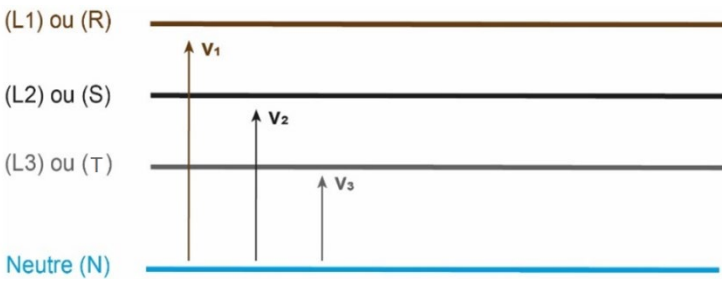
Figure 5

En alternatif :

- Le réseau TBT (très basse tension) couvre une plage comprise entre 0 et 50V.
- Le réseau BT (basse tension) couvre une plage comprise entre 50V et 1KV.
- Le réseau MT (moyenne tension) ou HTA couvre une plage comprise entre 1KV et 50KV

II-2-1 Présentation du réseau triphasé basse tension.

La distribution d'énergie se fait à partir de quatre fils :
Trois fils de phase repérés par 1, 2, 3 ou R, S, T et un fil neutre N.



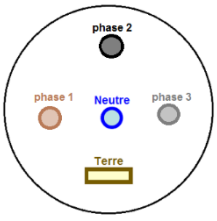


Figure 6

Généralement, les couleurs utilisées pour chaque fil sont :

Region	Earth (E)	Neutral (N)	Line 1 (L1)	Line 2 (L2)	Line 3 (L3)
Europe & UK	Green	Blue	Brown	Black	Grey
USA	Green	White	Black	Red	Blue

Figure 7

II-2-2 Tensions simples.

a- Définition.

Les tensions simples V1, V2, V3 représentent les différences de potentiel entre chaque fil de ligne et le neutre. Elles sont aussi appelées tensions entre phase et neutre. Leurs valeurs efficaces sont notées par V.

Exemple de tension simple : 110V, 220V, 230V .

b- Equations horaires des tensions simples.

On dispose donc de trois tensions simples, dont les équations horaires sont :

$v_1(t) = V_{max}.\sin\omega t$

$v_2(t) = V_{max}.\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$

$v_3(t) = V_{max}.\sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$

c) Oscillogrammes :

Les tensions simples sont déphasées de 2π/3 (120°) l'une par rapport à l'autre

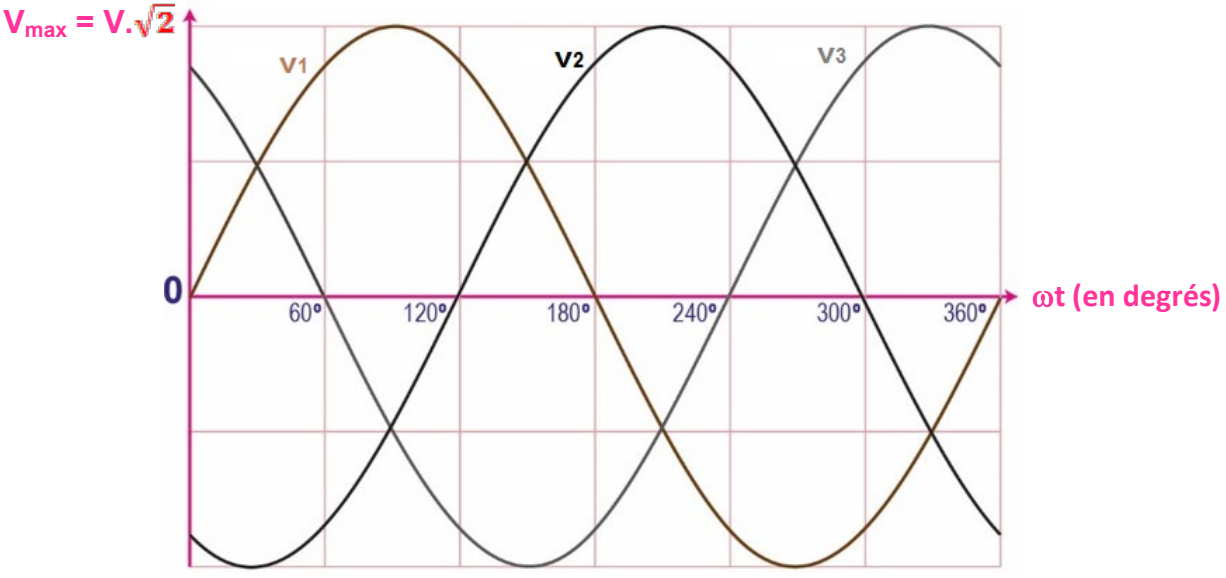


Figure 8

d) Représentation vectorielle associée :

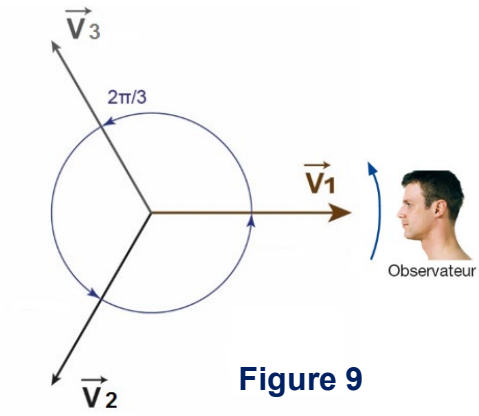


Figure 9

Le système est équilibré direct :

- Equilibré car la construction de fresnel montre que $\vec{V_1} + \vec{V_2} + \vec{V_3} = \vec{0}$

- Direct car un observateur immobile voit les vecteurs défiler devant lui dans l'ordre 1, 2, 3.

II-2-3 Tensions composées.

a) Définition.

Les tensions composées U_{12}, U_{23}, U_{31} représentent les différences de potentiel entre deux fils de ligne. Elles sont aussi appelées tensions entre phases. Leur valeur efficace est notée U.

Les relations liant les tensions simples aux tensions composées sont:

$$u_{12}(t) = v_1(t) - v_2(t) \Leftrightarrow \vec{U}_{12} = \vec{V}_1 - \vec{V}_2$$

$$u_{23}(t) = v_2(t) - v_3(t) \Leftrightarrow \vec{U}_{23} = \vec{V}_2 - \vec{V}_3$$

$$u_{31}(t) = v_3(t) - v_1(t) \Leftrightarrow \vec{U}_{31} = \vec{V}_3 - \vec{V}_1$$

b) Représentation vectorielle associée :

Moyennant les relations précédentes, on a donc :

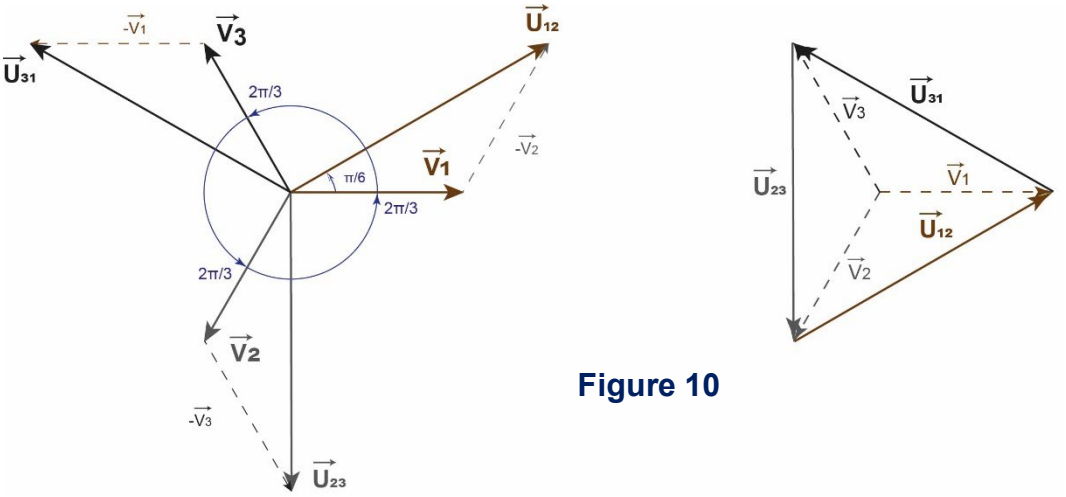


Figure 10

Les vecteurs tensions composées sont de même norme donc les tensions composées ont la même valeur efficace.
Les tensions composées forment un système triphasé équilibré, elles sont en avance de phase de 30° (π/6) par rapport aux tensions simples.

c) Oscillogrammes :

Les oscillogrammes des tensions simples et des tensions composées sont donnés par la figure ci-après :

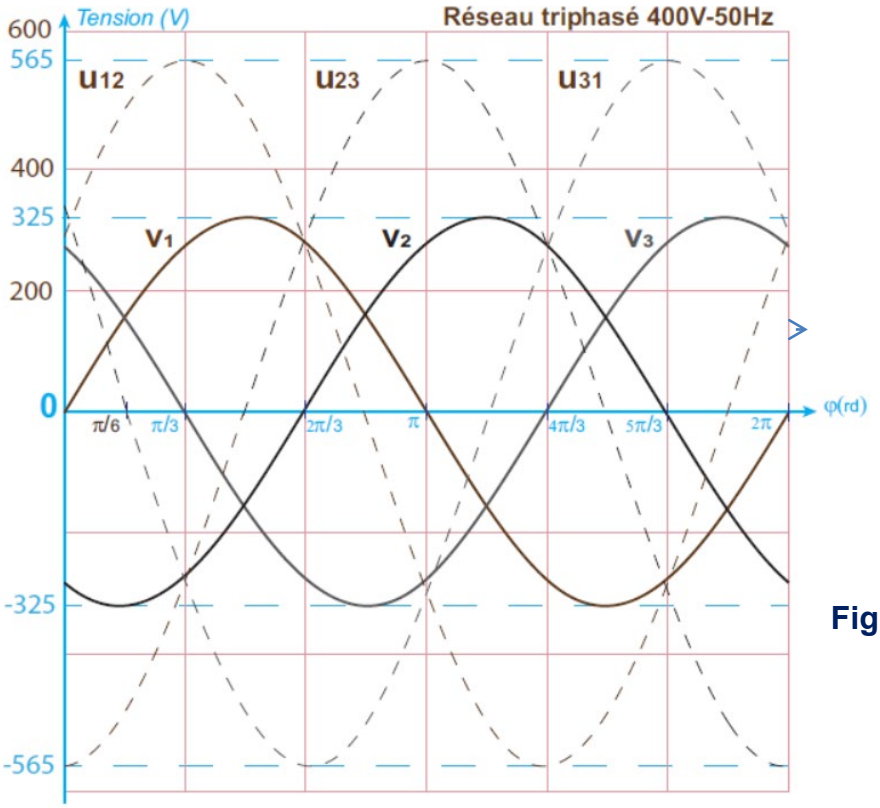


Figure 11

d- Equations horaires des tensions composées:

Les équations horaires des tensions composées sont données ci-dessous :

$$u_{12}(t) = U_{max}.\sin(\omega t - \frac{\pi}{6})$$
$$u_{23}(t) = U_{max}.\sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$
$$u_{31}(t) = U_{max}.\sin(\omega t - \frac{7\pi}{6})$$

II-2-4- Relation entre U et V

Considération géométriques :

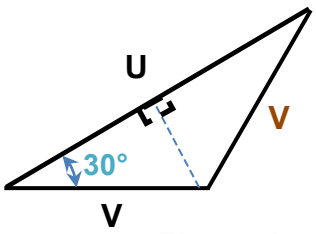


Figure 12

$$\frac{U}{2} = V.\cos(30°) \Rightarrow \frac{U}{2} = V.\frac{\sqrt{3}}{2}$$

D'ou $U = \sqrt{3}.V$

II-2-5- Identification d'un réseau triphasé

Pour identifier un réseau triphasé, il existe deux notations possibles :

Exemple :

- **3 x 400 V :** réseau triphasé avec tension composée de 400V.
- **230/400 V** : réseau triphasé avec tension simple de 230V et tension composée de 400 V.

THÈME 5 : SYSTEMES TRIPHASES EQUILIBRES
Séquence 2 : Moteurs asynchrones triphasés

I- Introduction
Les moteurs asynchrones triphasés cumulent de multiples avantages : ils sont simples, robustes et d'entretien faciles. Toutes ces raisons expliquent leur popularité en milieu industriel. Leurs applications sont nombreuses. On les retrouve, par exemple dans :
- les pompes,
- les convoyeurs,
- les élévateurs,
- les palans,
- etc...

II- Présentation
II-1- Constitution

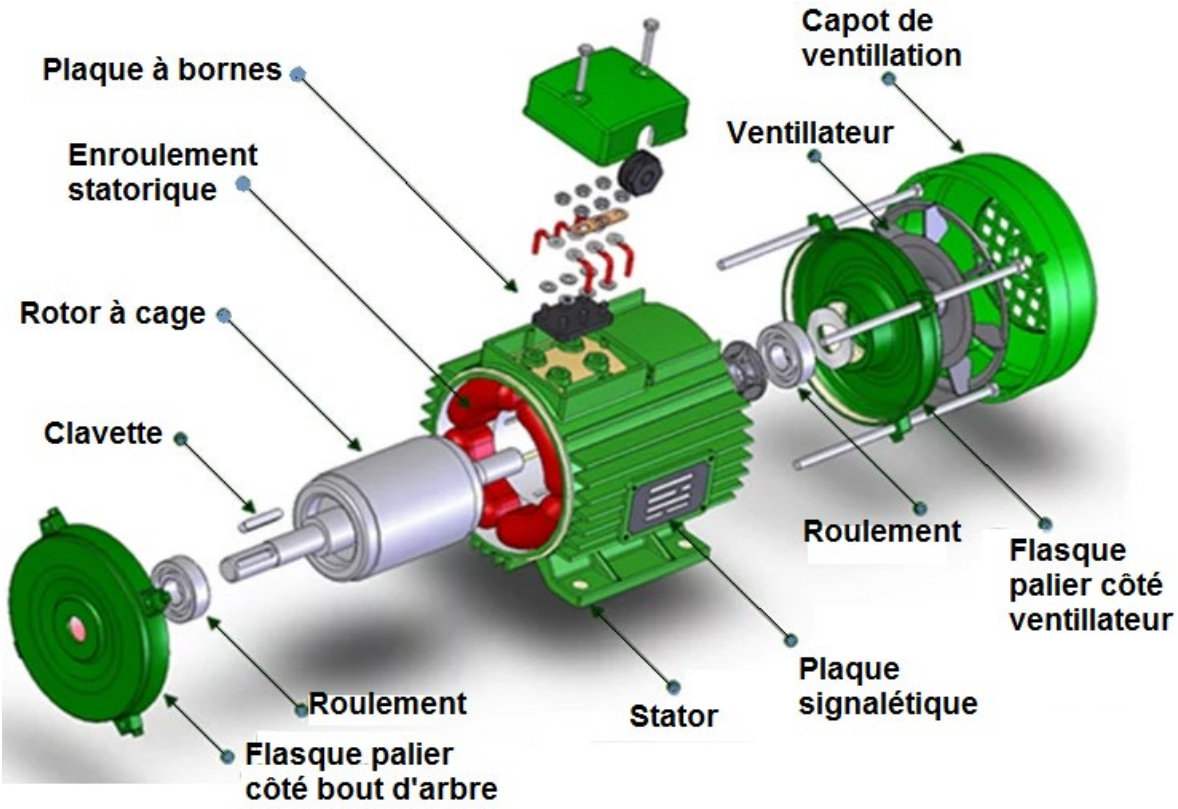


Figure 13

Un moteur asynchrone triphasé se compose de deux parties principales :
• Le stator : C'est la partie fixe du moteur. Il est alimenté par le réseau triphasé ou par un variateur de vitesse.
• Le rotor : C'est la partie mobile du moteur. Il est constitué de conducteurs en court-circuit qui sont parcourus par des courants induits par le champ magnétique créé par les courants statoriques.

II-1-1- Le stator
Le stator se compose principalement :
- des paliers,
- des flasques de palier,
- du ventilateur refroidissant le moteur,
- du capot protégeant le ventilateur.

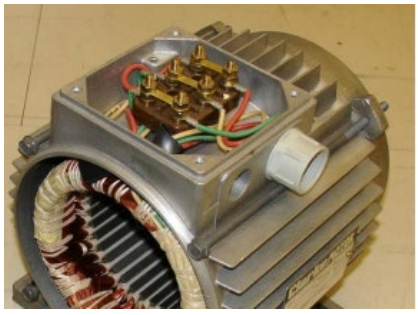


Figure 14

L'intérieur du stator comprend essentiellement :
- un noyau en fer feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique,

- les enroulements (ou bobinage en cuivre) des trois phases logés dans les encoches du noyau.

II-1-2- Le rotor

Le rotor est la partie mobile du moteur. Il se compose essentiellement :

- D'un empilage de disques minces isolés entre eux et clavetés sur l'arbre du rotor afin de canaliser et de faciliter le passage du flux magnétique ;

Figure 15

- d'une **cage d'écureuil** en aluminium coulé dont les barreaux sont de forme trapézoîdale pour les moteurs asynchrones standards et fermés latéralement par deux "flasques" conductrices.

Cet ensemble conducteur en aluminium est appelé ***cage d'écureuil***.

II-2- Principe de fonctionnement

Dans un moteur triphasé les enroulements sont au nombre minimum de trois décalés l'un de l'autre de 120° comme le montre le schéma ci-contre.

Lorsque les enroulements du stator sont parcourus par un courant triphasé, ceux-ci produisent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme (ns). La vitesse de synchronisme est fonction de la fréquence du réseau d'alimentation (50 Hz en Tunisie) et du nombre de paires de pôles.

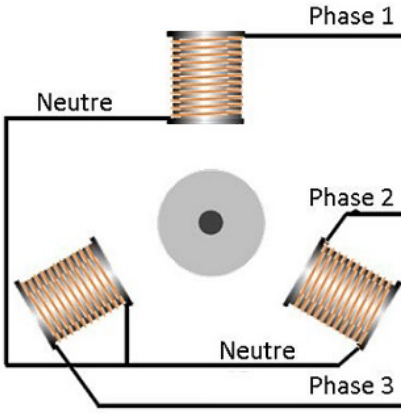


Figure 16

Vu que la fréquence est fixe, la vitesse de rotation du champ tournant du moteur ne peut varier qu'en fonction du nombre de paires de pôles. La figure suivante montre quelques exemples du nombre de paires de pôles

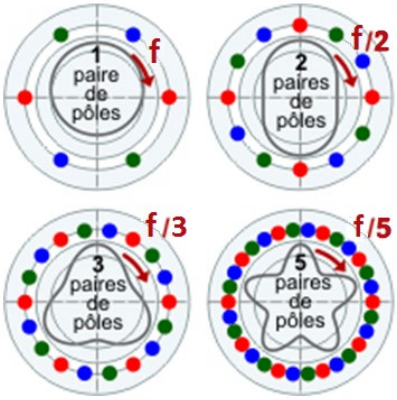


Figure 17 : Exemples de paires de pôles.

La vitesse (fréquence) de synchronisme s'exprime par la relation suivante :

$n_s = f / p$

Avec :

n_s : vitesse du champ tournant ou vitesse de synchronisme en tr/s.

f : fréquence du réseau (en général 50 Hz)

p : nombre de paires de pôles.

Pour une fréquence du réseau d'alimentation de 50Hz, la vitesse de synchronique prend les valeurs illustrées par le tableau suivant :

Moteur	Nombre de pôles (2p)	Nombre de paires de pôles (p)	Vitesse de synchronisme (ns) en tr/min
Bipolaire	2	1	**3000**
Tétrapolaire	4	2	**1500**
Héxapolaire	6	3	**1000**
Octopolaire	8	4	**750**

II-3- Glissement

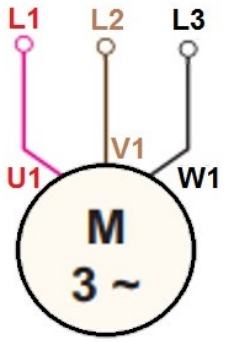
La vitesse de rotation de l'arbre du moteur (du rotor) notée (n) est légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant).
Le glissement est défini par l'écart relatif entre la vitesse du rotor (n) et la vitesse du champ tournant (ns). Il dépend de la charge mécanique accouplée à l'arbre du moteur. Il s'exprime par la relation suivante :

$$g = \frac{ns - n}{ns} = 1 - \frac{n}{ns} = \frac{\Omega s - \Omega}{\Omega s} = 1 - \frac{\Omega}{\Omega s}$$

Avec :
n_s : vitesse du champ tournant. n : vitesse de rotation de l'arbre (du rotor).
Ωs : vitesse angulaire de synchronisme. Ω : vitesse angulaire du rotor.
Le glissement est généralement exprimé en pourcent.

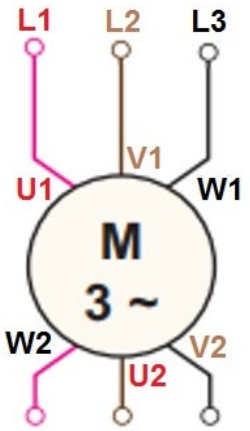
II-4- Symboles

Symbole d'un moteur asynchrone triphasé à couplage interne (Y ou Δ)

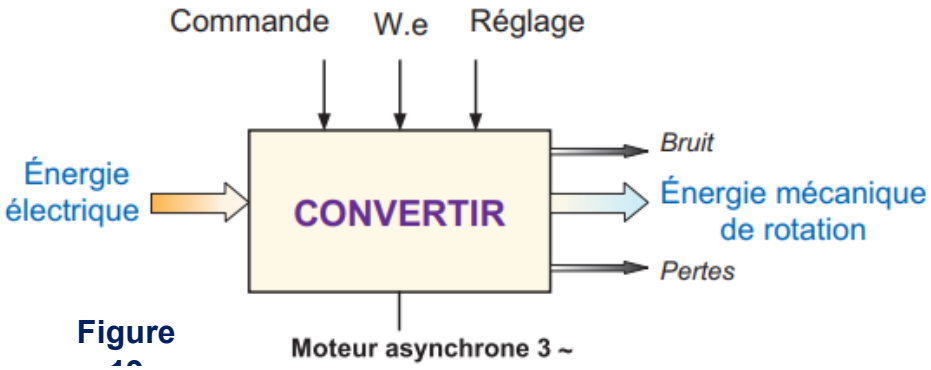


Figure

Symbole d'un moteur asynchrone triphasé à choix de couplage (Y ou Δ)



II-5- Modélisation



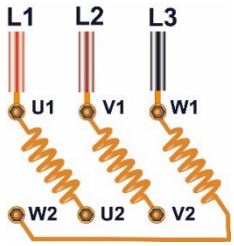
Figure

III- Plaque à bornes et couplage

III-1- Plaque à bornes.

Le moteur asynchrone triphasé dispose d'une plaque à bornes où sont disponibles les extrémités des enroulements du stator :
La plaque à bornes d'un moteur asynchrone comporte toujours 6 bornes repérées par les désignations U1, V1, W1 et W2, U2, V2.
Les bornes repérées U1, V1, W1
sont toujours reliées au réseau d'alimentation.

Figure



Figure

III-2- Couplage des enroulements.

Pour raccorder correctement un moteur asynchrone triphasé, il faut déterminer le couplage des enroulements du moteur en fonction de la tension du réseau.

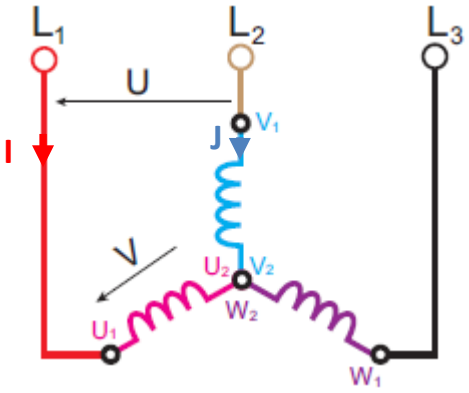
Deux couplages sont possibles :

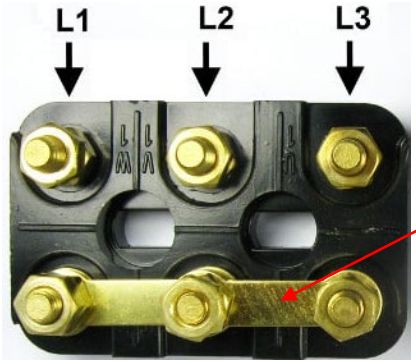
- Couplage des enroulements en étoile ;
- couplage des enroulements en triangle.

III-2-1- Couplage étoile :

SYMBOLE : Y ou λ

Trois enroulements sont montés en étoile, lorsque leur sortie U_2, V_2, W_2 (point neutre) sont reliées entre elles et leur entrée U_1, V_1, W_1 sont reliées respectivement aux phases du secteur.





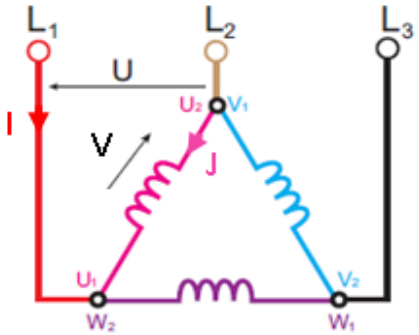
Figure

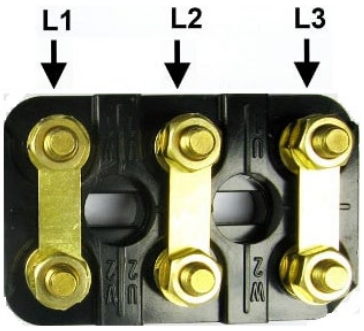
- Dans le cas d'un couplage étoile, les enroulements du stator sont soumis à la tension simple du réseau (V). On retiendra donc qu'en couplage étoile $U = \sqrt{3}.V$
- On constate sur le schéma que le courant en ligne (I) est égal au courant de phase (J). On retiendra donc qu'en couplage étoile : $I = J$

III-2-2- Couplage triangle.

SYMBOLE : Δ

Trois enroulements sont montés en triangle si chacun d'eux est branché entre deux fils de phase. Le neutre n'étant pas utilisé.





Figure

- Dans le cas d'un couplage triangle, les enroulements du stator sont soumis à la tension composée du réseau (U). On retiendra donc qu'en couplage triangle **U = V**

- On constate sur le schéma que le courant traversant un enroulement (J) est diffèrent du courant de ligne (I). On retiendra qu'en couplage triangle : $I = \sqrt{3} . J$

III-2-3- Inversion du sens de rotation

Pour inverser le sens de rotation d'un moteur asynchrone triphasé, il suffit de permuter deux parmi trois fils de l'alimentation du moteur ainsi on inverse le sens du champ magnétique tournant.

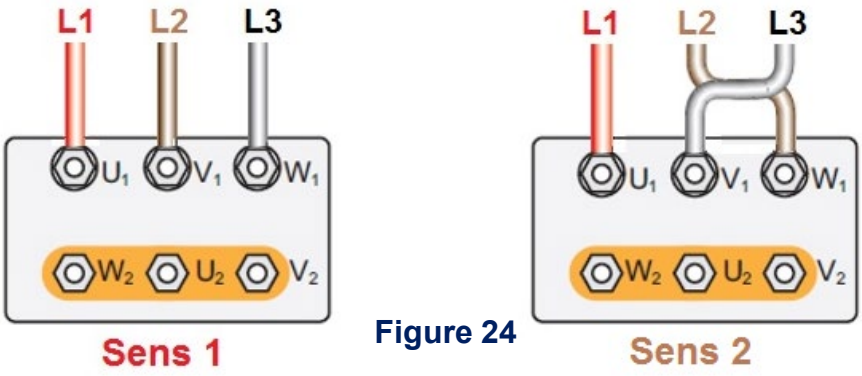


Figure 24

IV- Puissances mises en jeu en triphasé

IV-1- Puissance active (P)

La puissance active (P) est exprimée en watts (W). On la qualifie de **puissance réelle** ou "utile" : c'est celle qui est effectivement développée par les appareils électriques.

IV-1-1- Cas d'un couplage étoile

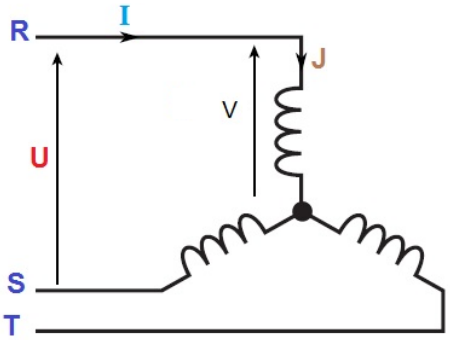
- Pour une phase on a : $P_1 = V.J.\cos\varphi$

Avec $\cos\varphi$: facteur de puissance et φ (V , J) le déphasage entre V et J.

- Le système étant équilibré, pour l'ensemble des bobines, on a donc : $P = 3.P_1 = 3.V.J.\cos\varphi$

Or en étoile, $I = J$ et $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$ d'où $P = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi$

P en Watts (W) , U en Volt (V) , I en Ampère (A).



Figure

IV-1-2- Cas d'un couplage triangle

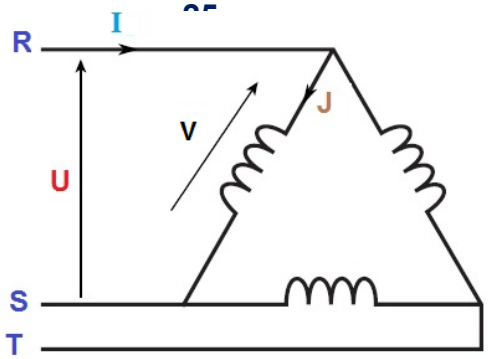
- Pour une phase on a : $P_1 = V.J.\cos\varphi$

Avec $\cos\varphi$: facteur de puissance et φ (V , J) le déphasage entre V et J.

- Le système étant équilibré, pour l'ensemble des bobines, on a donc : $P = 3.P_1 = 3.V.J.\cos\varphi$

Or en triangle, $U = V$ et $J = \frac{I}{\sqrt{3}}$ d'où $P = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi$

P en Watts (W) , U en Volt (V) , I en Ampère (A).



Figure

Remarque

Quel que soit le couplage, les puissances actives s'expriment de la même façon

$P = 3. V. J. \cos\varphi = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi$

IV-2- Puissance réactive (Q)

Moins visible et plus complexe à définir, la puissance réactive permet de mesurer la puissance des champs magnétiques d'un réseau ou d'un appareil. Par exemple, là où c'est la puissance active qui fait tourner un moteur, la bobine de ce moteur utilise la puissance réactive. Plusieurs types d'appareils sont concernés par la puissance réactive :

- Les appareils à froids ;
- les ordinateurs ;
- les appareils à moteurs.

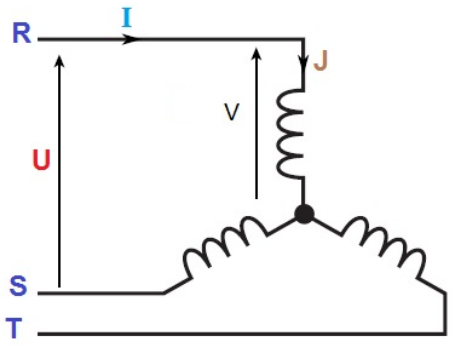
IV-2-1- Cas d'un couplage étoile

- Pour une phase on a : $Q_1 = V.J.\sin\varphi$

- Le système étant équilibré, pour l'ensemble des bobines, on a donc : $Q = 3.Q_1 = \mathbf{3}.V.J.\sin\varphi$

Or en étoile, $I = J$ et $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$ d'où $\mathbf{Q = \sqrt{3}.U.I.\sin\varphi}$

Q en Volt-Ampère Réactif (VAR), U en Volt (V), I en Ampère (A).



Figure

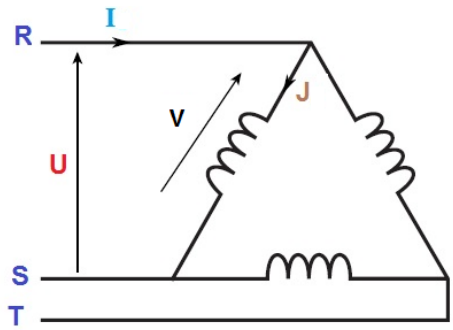
IV-2-2- Cas d'un couplage triangle

- Pour une phase on a : $Q_1 = V.J.\sin\varphi$

- Le système étant équilibré, pour l'ensemble des dipôles on a donc : $Q = 3.Q_1 = \mathbf{3}.V.J.\sin\varphi$

Or en triangle, $U = V$ et $J = \frac{I}{\sqrt{3}}$ d'où $\mathbf{Q = \sqrt{3}.U.I.\sin\varphi}$

Q en Volt-Ampère Réactif (VAR), U en Volt (V), I en Ampère (A).



Figure

Remarques

- Quel que soit le couplage, les puissances réactives s'expriment de la même façon

$$\mathbf{Q = 3.V.J.\sin\varphi = \sqrt{3}.U.I.\sin\varphi}$$

- Certaines machines, comme celles qui utilisent des résistors (cas d'un four pour la production de chaleur), n'impliquent aucune puissance réactive (Q = 0).

IV-3- Puissance apparente (S)

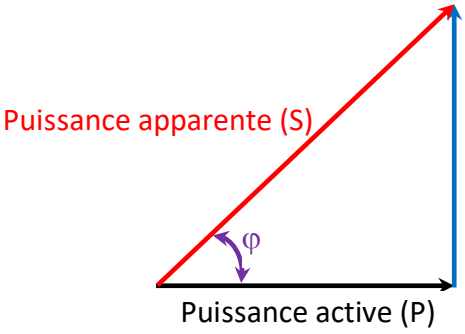
C'est la puissance de dimensionnement. Elle rassemble la puissance active et réactive. On utilise cette puissance pour dimensionner les installations électriques. Elle est exprimée en Volt-Ampère (VA).
Il existe plusieurs manières de calculer la puissance apparente. Quel que soit le couplage, les puissances apparentes s'expriment de la même façon. La formule la plus utilisée est :

$$\mathbf{S = 3.V.J = \sqrt{3}.U.I}$$

S en Volt-Ampère (VA), U en Volt (V) , I en Ampère (A).

IV-4- Triangle de puissances :

Un triangle de puissance est la représentation graphique de la puissance réelle ou active, de la puissance réactive et de la puissance apparente dans un triangle rectangle.



Figure

$$S = \sqrt{P^2+Q^2}$$

$$Q = P.\tan\varphi$$

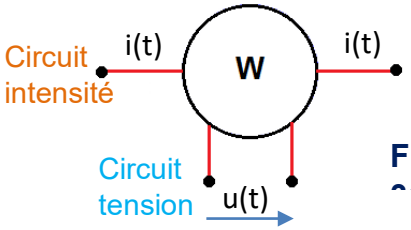
$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

IV-5- Mesure des puissances :

IV-5-1- Le wattmètre

Le wattmètre permet de mesurer la puissance active (P) en monophasé ou en triphasé.
Il possède au moins quatre bornes : deux bornes pour mesurer la tension et deux bornes pour mesurer le courant. Il y a donc deux branchements à réaliser : un branchement en parallèle (comme un voltmètre) pour mesurer la tension, et un branchement en série (comme un ampèremètre) pour mesurer le courant. Le wattmètre tient compte du déphasage.

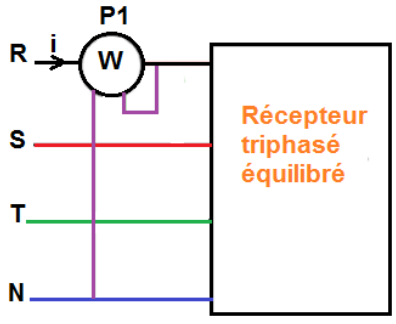
Figure



Figure

IV-5-2- Mesure de la puissance active par la méthode d'un seul wattmètre

Pour un système équilibré où le fil du neutre est accessible, on utilise un seul wattmètre selon le schéma de principe de la figure suivante :

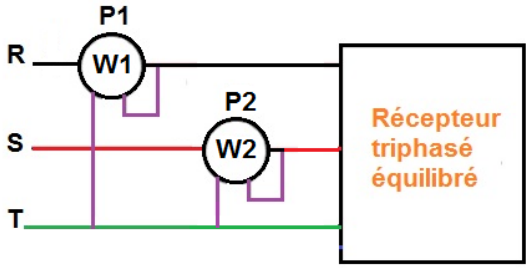


Figure

Le wattmètre mesure : $P_1 = V.J.\cos\varphi$.
La puissance totale absorbée est :
$\mathbf{P = 3.P_1} = 3.V.J.\cos\varphi = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi$

IV-5-3- Mesure des puissances par la méthode de deux wattmètres.

Pour un système déséquilibré ou un système équilibré où le fil du neutre n'est pas accessible, on utilise deux wattmètres selon le schéma de principe de la figure suivante :



Figure

Si P_1 et P_2 sont les mesures de W_1 et W_2, alors on peut montrer que :

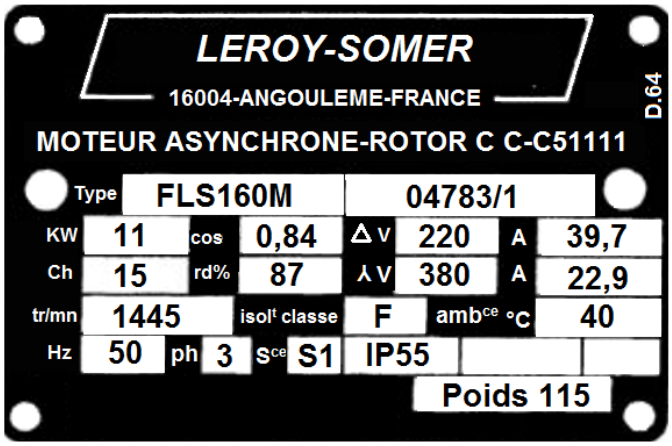
$\mathbf{P = P_1 + P_2}$

On peut déterminer la puissance réactive par l'expression :

$\mathbf{Q = \sqrt{3}.(P_1 - P_2)}$

V- Plaque signalétique

La plaque signalétique est la carte d'identité d'un moteur. Tous les renseignements utiles y sont répertoriés. Il est intéressant de connaître la signification des différents symboles, chiffres et abréviation.


LEROY-SOMER
16004-ANGOULEME-FRANCE
D.64
MOTEUR ASYNCHRONE-ROTOR C C-C51111
Type FLS160M 04783/1
KW 11 cos 0,84 Δ V 220 A 39,7
Ch 15 rd% 87 λ V 380 A 22,9
tr/mn 1445 isolt classe F ambce °C 40
Hz 50 ph 3 Sce S1 IP55
Poids 115

Figure

- FLS160M : référence propre au constructeur ;
- 04783/1 :
- 11Kw : puissance utile nominale délivrée sur l'arbre du moteur ;
- 15Ch : puissance utile nominale délivrée sur l'arbre du moteur exprimée en cheval ; (1Ch = 736W)
- 0,84 : facteur de puissance nominal ou cosφ ;
- 87% : rendement nominal du moteur ;
- 220V/380V : la première indique la valeur nominale de la tension aux bornes d'un enroulement. Elle détermine le couplage (étoile ou triangle) à effectuer en fonction de la tension du réseau d'alimentation :
  - 220V: tension composée appliquée pour un couplage triangle ;
  - 380V : tension composée appliquée pour un couplage étoile.

- 39,7A/22,9A : elles représentent l'intensité en ligne (dans chaque phase) pour chacun des couplages :
  - 39,7A : courant en ligne pour un couplage triangle ;
  - 22,9A : courant en ligne pour un couplage étoile.

- 1445 tr/min : indique la vitesse nominale du rotor. On l'appelle aussi vitesse réelle. On peut déduire alors la vitesse de synchronisme **ns** du moteur (dans ce cas ns=1500tr/min) ;

- 40°C : Température ambiante (utilisation recommandée maximale) ;

- 50Hz : fréquence du réseau d'alimentation ;

- Ph 3 : moteur triphasé ;

- 115 kg : Poids du moteur ;

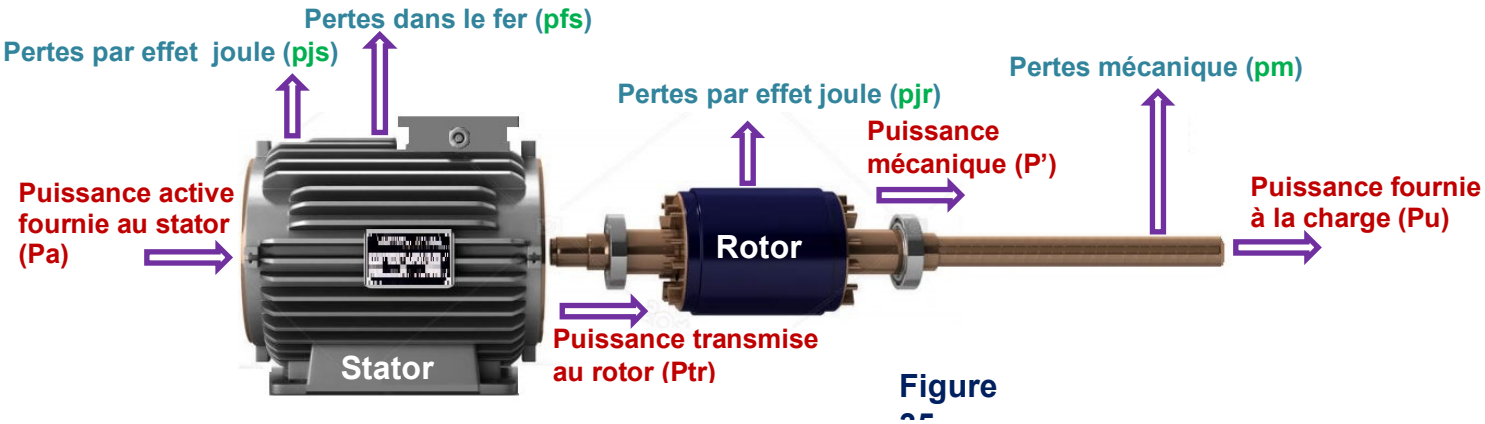
- IP55 : Indice de protection IP (indique le degré de protection contre l'eau, la poussière, les chocs mécaniques) ;

- S1 : Service (utilisation en marche continue, intermittente...) ;

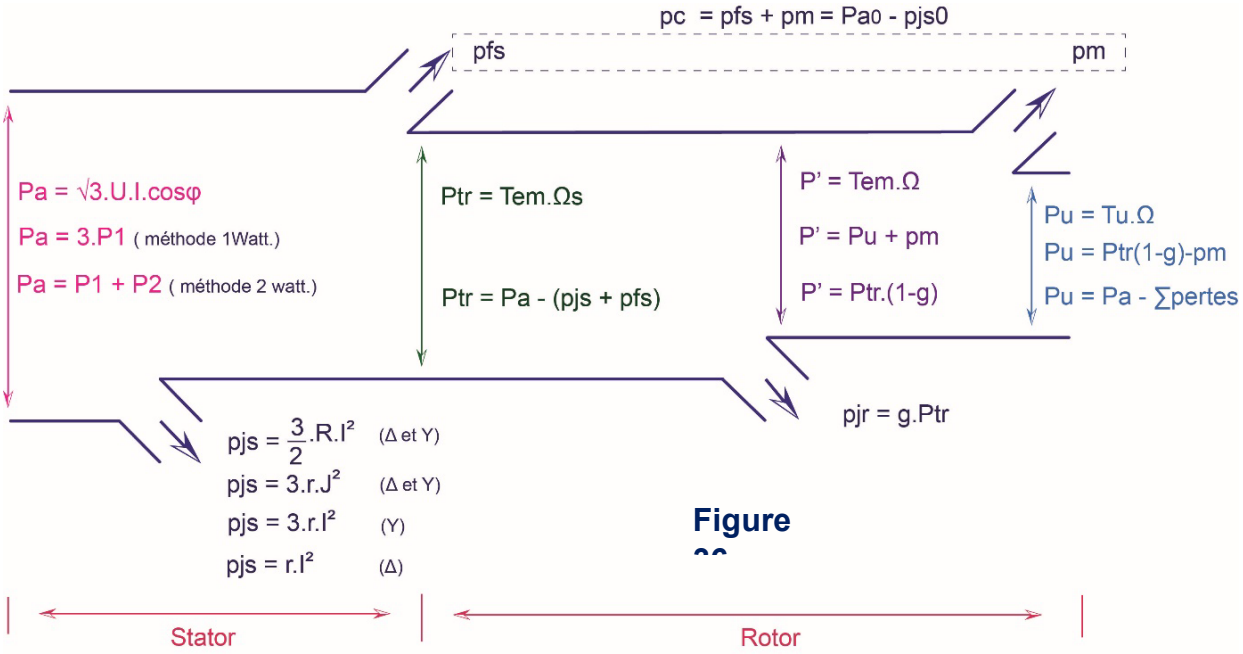
- Classe d'isolement : non indiquée.

VI- Bilan de puissances

Le bilan de puissances pour un moteur asynchrone peut être illustré de la façon suivante:


Pertes dans le fer (pfs)
Pertes par effet joule (pjs)
Pertes par effet joule (pjr)
Pertes mécanique (pm)
Puissance mécanique (P')
Puissance active fournie au stator (Pa)
Puissance fournie à la charge (Pu)
Rotor
Stator
Puissance transmise au rotor (Ptr)

Figure


pc = pfs + pm = Pa0 - pjs0
pfs
pm
Pa = √3.U.I.cosφ
Pa = 3.P1 (méthode 1Watt.)
Pa = P1 + P2 (méthode 2 watt.)
Ptr = Tem.Ωs
Ptr = Pa - (pjs + pfs)
P' = Tem.Ω
P' = Pu + pm
P' = Ptr.(1-g)
Pu = Tu.Ω
Pu = Ptr(1-g)-pm
Pu = Pa - ∑pertes
pjr = g.Ptr
pjs = 3/2.R.I² (Δ et Y)
pjs = 3.r.J² (Δ et Y)
pjs = 3.r.I² (Y)
pjs = r.I² (Δ)
Stator
Rotor

Figure

VI-1- Puissances mises en jeu dans un moteur asynchrone triphasé

VI-1-1 Puissance absorbée (Pa).

La puissance absorbée par un moteur asynchrone est une puissance active électrique.
Lorsque le moteur est connecté à un réseau triphasé, Pa vérifie la relation **$Pa = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi$**
Avec U : tension composée du réseau.
I : courant de ligne.
$\cos\varphi$: facteur de puissance du moteur.

VI-1-2- Pertes par effet Joule au stator (pjs).

Soit : **r :** La résistance de chaque enroulement statorique
R : La résistance mesurée à chaud entre deux fils de ligne (entre bornes)

Cas d'un couplage étoile :

R = 2.r

pjs = 3.r.J^2 or I = J d'ou **pjs = 3.r.I^2 = $\frac{3}{2}$.R.I^2**

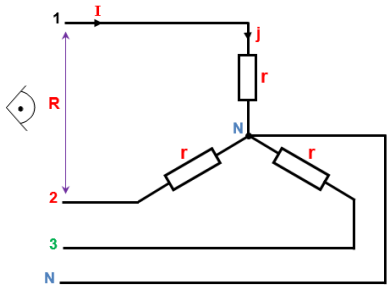


Figure 37

Cas d'un couplage triangle :

R = $\frac{r.2r}{3r}$ = $\frac{2}{3}$.r

pjs = 3.r.J^2 or J = $\frac{1}{\sqrt{3}}$ d'où **pjs = r.I^2 = $\frac{3}{2}$.R.I^2**

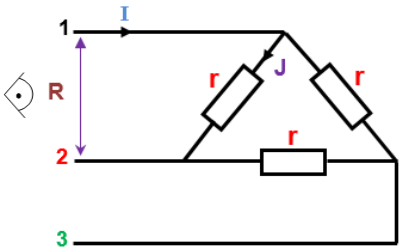


Figure 38

☞ **Conclusion** : Quel que soit le couplage étoile ou triangle les pertes par effet joule dans le stator ont la même expression : **pjs = 3. r.J^2 = $\frac{3}{2}$.R.I^2**

VI-1-3- Pertes fer dans le stator (pfs).

Les pertes fer sont fonctions du flux magnétique. Elles ne dépendent donc que de la tension d'alimentation et de la fréquence des courants statoriques. Or, en régime de fonctionnement normal, ces grandeurs ne varient pas et, par conséquent, les pertes fer peuvent être considérées comme constantes quelle que soit la charge du moteur. Les pertes fer sont mesurées lors d'un essai à vide, en même temps que les pertes mécaniques.

VI-1-4- Puissance transmise au rotor (Ptr).

C'est la puissance électrique que transmet le stator au rotor par le couple électromagnétique

Tém: **Ptr = Tém.ΩS = Pa - pjs – pfs**

VI-1-5- Pertes par effet Joule au rotor (pjr).

Les pertes par effet Joule au rotor sont fonction de la puissance transmise. On peut par ailleurs montrer qu'elles sont aussi fonction du glissement.
En effet, les grandeurs pjr et Ptr sont liées par la relation : **pjr = g · Ptr**

VI-1-6- Puissance mécanique (P') ou puissance électromagnétique (Pem).

C'est la puissance mécanique totale fournie par le rotor.

P' = Ptr − pjr = Ptr . (1 – g)

Le rotor, tournant à la vitesse Ω, est soumis à un couple électromagnétique Tem. Il reçoit par conséquent une puissance égale à :

P' = Tem · Ω

VI-1-7- Pertes mécaniques (pm).

Les pertes mécaniques dépendent uniquement de la vitesse de rotation du moteur. Or, nous l'avons vu précédemment, la vitesse du moteur ne varie que relativement peu avec la charge, la vitesse à vide étant relativement proche de la vitesse de synchronisme. Dans un moteur asynchrone, les pertes mécaniques seront par conséquent considérées comme constantes, et déterminées à l'aide d'un essai à vide.

VI-1-8- Puissance utile (Pu)

C'est la puissance développée au bout de l'arbre du moteur sous forme mécanique. Son expression est :

$Pu = Pa - (pjs + pfs + pjr + pm) = Pa - \Sigma \text{ pertes} = Tu \cdot \Omega = Ptr \cdot (1 - g) - pm$

VI-1-9- Détermination des pertes constantes (pc = pfs + pm).

Les pertes constantes (pc), aussi appelées pertes collectives, regroupent les pertes fer et les pertes mécaniques. Pour les déterminer, on réalise un essai à vide.
En effet, si l'on regarde le bilan des pertes et des puissances de la figure 36, on voit que :
$Pu_0 = P_0 - pjs_0 - pc - pjr_0$
Or, à vide, le glissement est nul : g = 0 donc $pjr_0 = 0$.
De plus, toujours à vide, le moteur ne délivre pas de puissance utile donc $Pu_0 = 0$. En remplaçant ces valeurs dans l'équation précédente, il vient que :
$pc = P_0 - pjs_0$

Remarque:
Les courants induits au rotor provoquent aussi des pertes magnétiques dans le fer du rotor désignées par pfr. Ces pertes qui dépendent de la fréquence des courants rotoriques qui sont faibles à leurs tours sont considérées négligeables devant les autres pertes.

VI-2- Couples

VI-2-1- Couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique est créé par le stator afin d'entrainer le rotor en rotation. Il est désigné par Tem. $\mathbf{Tem = \frac{Ptr}{\Omega s} = \frac{P'}{\Omega}}$

Avec : Tem en Newton mètre (Nm)
Ptr , P' en watts (W)
Ωs , Ω en radians par seconde (rad/s)

VI-2-2- Couple utile :

Le couple utile est disponible sur l'arbre du moteur et sert à entrainer la charge accouplée. Il est désigné par Tu. $\mathbf{Tu = \frac{Pu}{\Omega}}$

Avec : Tu en Newton mètre (Nm)
Pu en watts (W)
Ω en radians par seconde (rad/s)

VI-2-3- Couple des pertes :

Le couple des pertes représente le couple résistant produit par le frottement des paliers, des roulements et de la ventilation. Il est désigné par Tp:

VI-3- Rendement

Le rendement du moteur asynchrone est le rapport entre la puissance utile mécanique qu'il fournit et la puissance électrique qu'il absorbe. Il est désigné par η. Son expression est :
$\eta = Pu/Pa$
Avec : Pa en watts (W),
Pu en watts (W)
η exprimé généralement en pourcent (%)

VII- Fonctionnement à vide et en charge des moteurs asynchrones triphasés.

VII-1- Fonctionnement à vide.

A vide le moteur n'entraîne aucune charge. Conséquences :
$Tu = 0 \Rightarrow Pu = 0$
$g = 0 \Rightarrow Pjr = 0$
$P_0 = \sqrt{3}.U.I_0.\cos\varphi_0 = pjs_0 + pfs + pm = pjs_0 + pc$
Un essai à vide permettra de déterminer les pertes collectives (supposées constantes).

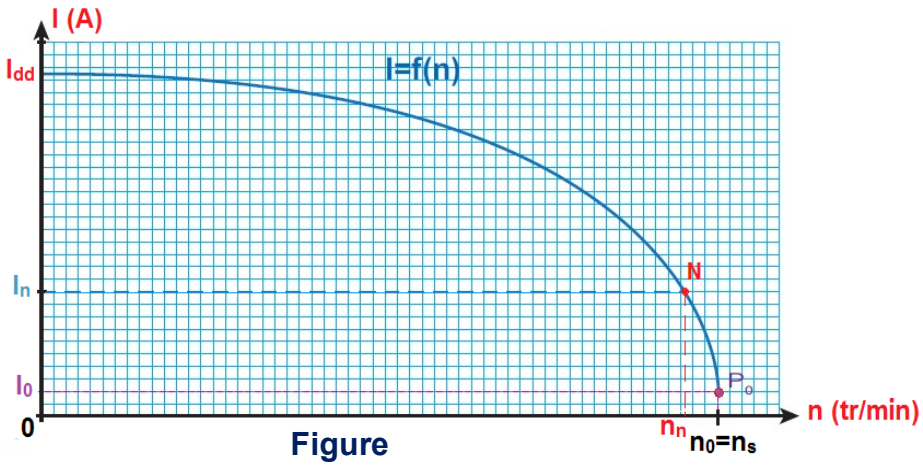
VII-2- Fonctionnement en charge

Le moteur est chargé, c'est-à-dire que l'arbre de ce dernier entraîne une charge résistante qui s'oppose au mouvement du rotor. En régime permanent, le couple moteur sera égal au couple résistant : **Tu = Tr**.

VIII- Caractéristiques.

VIII- 1- Caractéristique électromécanique I = f(n)

Le courant est très élevé au démarrage. Puis, à partir de 80% de la vitesse de synchronisme (g=20%), le courant décroît rapidement jusqu'au point de fonctionnement à vide correspondant à la puissance à vide P_0.



Figure

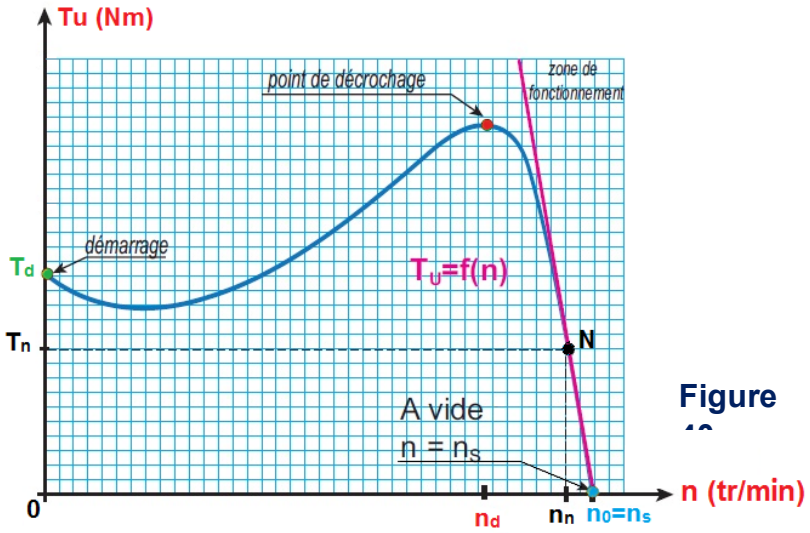
Avec :

- I_{dd} : Courant de démarrage direct.
- I_n : Courant nominal.
- I_0 : Courant à vide.
- n_0 : Vitesse de rotation à vide.
- n_n : vitesse de rotation nominale.

La caractéristique I = f(n), montre que la surintensité au moment de démarrage est généralement de 4 à 8 fois l'intensité nominale. Il en résulte une pointe d'intensité très importante.

VIII-2- Caractéristique mécanique Tu = f(n)

La variation de la charge mécanique entraine une variation simultanée du couple utile et de la vitesse de rotation selon la caractéristique suivante :



Figure

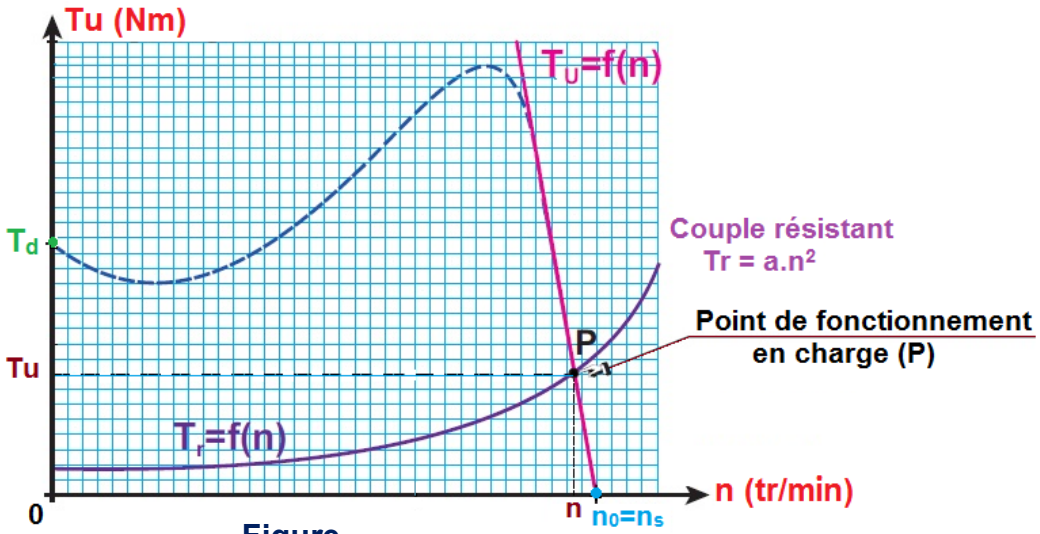
Avec :

- T_d : Couple au démarrage direct.
- T_n : Couple utile nominal.
- n_n : Vitesse de rotation nominale.
- n_0 : Vitesse de rotation à vide.
- n_s : Vitesse de synchronisme.

La caractéristique Tu = f(n), montre que:
- le couple de démarrage (T_d) est important;
- le moment du couple utile admet un maximum au point de décrochage;
- le moment du couple utile varie de façon presque linéaire au voisinage de la fréquence de rotation nominale. Cette partie linéaire d'équation Tu = a.n + b correspondant au fonctionnement normal du moteur.

VIII-3- Point de fonctionnement

La charge étant accouplée à l'arbre du moteur, elle présente un couple résistant "**Tr**" qui s'oppose au couple utile développé par le moteur.



Figure

Avec :

- T_d : Couple au démarrage direct.
- n_0 : Vitesse de rotation à vide.
- n_s : Vitesse de synchronisme.
- n : Vitesse de rotation au point de fonctionnement.
- Tr : couple résistant de la charge.
- Tu : couple utile au point de fonctionnement.

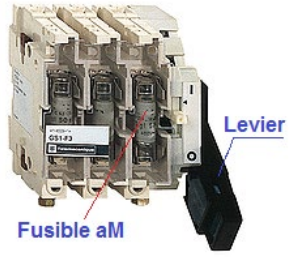
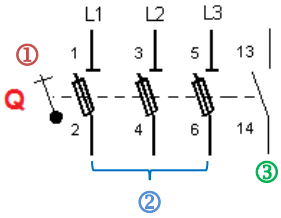
En fonctionnement normal et en régime établi, les deux couples sont égaux. $\mathbf{T_u = Tr}$ (Point de fonctionnement P).
Le point de fonctionnement, de coordonnées (Tu,n), est l'intersection de la caractéristique mécanique de la charge $T_r = f(n)$ avec la partie linéaire de la caractéristique mécanique du moteur $\mathbf{T_u = f(n)}$. Ce point de fonctionnement permet de calculer le glissement et la puissance utile.
Les coordonnées du point de fonctionnement peuvent être déterminées graphiquement ou algébriquement en posant l'égalité entre les équations des deux caractéristiques du couple.

IX- Commande et protection.

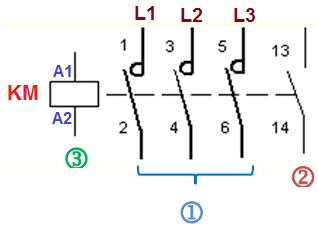
Le branchement d'un moteur asynchrone triphasé au réseau nécessite l'utilisation des appareils de commande et de protection adéquats.

IX-1- Appareils d'isolement, de commande, de protection et de signalisation

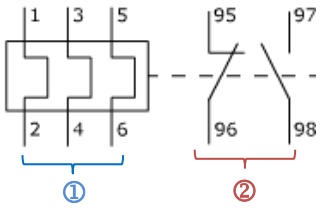
IX-1-1- Sectionneur porte fusible :

Désignation et forme commerciale	Fonction	Symbole
Sectionneur porte fusibles 	Le sectionneur porte fusibles assure deux fonctions principales : - Isolement (séparation) de la source d'alimentation électrique et de l'équipement grâce au sectionneur. - Protection contre les courts-circuits grâce aux cartouches fusibles de types « **aM** » (**a**ccompagnement **M**oteur) 	 ① : levier de commande Manuelle ② : Contacts principaux ③ : Contact auxiliaire

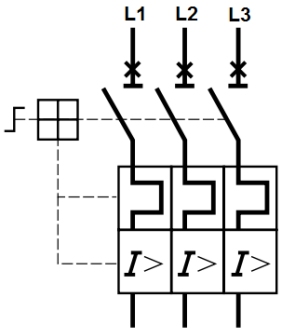
IX-1-2- Contacteur :

Désignation et forme commerciale	Fonction	Symbole
Contacteur 	Le contacteur est un appareil de commande capable d'établir ou d'interrompre le passage du courant électrique. Il assure la fonction commutation (commande à distance).	 ① : Contacts principaux ② : Contact auxiliaire ③ : bobine du contacteur (KM).

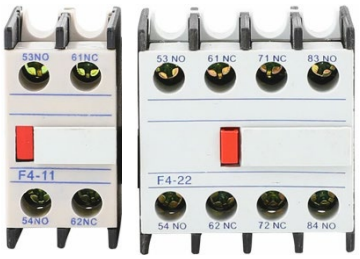
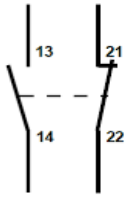
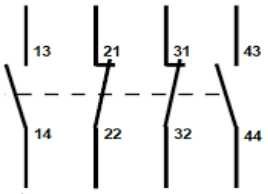
IX-1-3- Relais thermique :

Désignation et forme commerciale	Fonction	Symbole
Relais thermique 	Le relais thermique est un appareil de protection destiné au moyen de ses trois bilâmes, d'interrompre le circuit lors des surintensités dues aux surcharges lentes et prolongées du moteur.	 ① : Eléments thermiques ② : Contacts commande

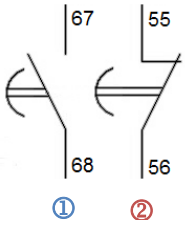
IX-1-4- Disjoncteur moteur magnéto-thermique:

Désignation et forme commerciale	Fonction	Symbole
Disjoncteur moteur	C'est un appareil de protection qui comporte deux déclencheurs, un déclencheur magnétique qui protège le moteur contre les courts-circuits et un déclencheur thermique qui protège le moteur contre les surintensités dues aux surcharges lentes.	

IX-1-5- Bloc de contacts auxiliaires

Désignation et forme commerciale	Fonction	Symbole
Bloc de contacts auxiliaires 	Le bloc de contacts auxiliaires est un appareil mécanique de connexion qui s'adapte aux contacteurs. Il permet d'ajouter de 2 à 4 contacts supplémentaires au contacteur. Les contacts sont prévus pour être utilisés dans la partie commande des circuits. Ils ont la même désignation et repérage dans les schémas que le contacteur sur lequel ils sont installés (KM...).	 

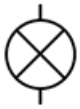
IX-1-6- Bloc auxiliaire temporisé

Désignation et forme commerciale	Fonction	Symbole
Bloc auxiliaire temporisé	Le bloc auxiliaire temporisé sert à retarder l'action d'un contacteur lors de l'ouverture ou la fermeture de ses contacts	 ① : Contact retardé à la fermeture ② : Contact retardé à l'ouverture

IX-1-7- Fusible de protection

Désignation et forme commerciale	Fonction	Symbole
Fusible de protection	Le fusible permet de protéger le circuit électrique contre les courts-circuits. Cet élément comporte un fil conducteur. Grâce à sa fusion, il coupe le circuit électrique lorsqu'il est soumis à une intensité du courant qui dépasse la valeur maximale supportée par le fil.	

IX-1-8- Voyant de signalisation

Désignation et forme commerciale	Fonction	Symbole
Voyants de signalisation	Le voyant permet une signalisation visuelle du fonctionnement normal du système ou d'un défaut.	

IX-2- Constitution de l'installation d'un moteur asynchrone triphasé

Les installations industrielles des moteurs asynchrones triphasés sont constituées de deux parties distinctes appelées : circuit de puissance et circuit de commande.

IX-2-1- Circuit de puissance.

Il comporte l'appareillage nécessaire au fonctionnement du moteur asynchrone triphasé. On trouve généralement :

- Un réseau triphasé ;
- un appareil d'isolement (sectionneur) ;
- des appareils de commande (les contacts principaux du contacteur) ;
- des appareils de protection (fusible, relais de protection, disjoncteur moteur magnéto-thermique));
- le moteur asynchrone triphasé.

IX-2-2- Circuit de commande

Il comporte l'appareillage nécessaire à la commande du moteur asynchrone triphasé. On trouve généralement :

- La source d'alimentation ;
- un appareil d'isolement (contact auxiliaire du sectionneur) ;
- une protection du circuit contre les courts-circuits (fusible) et contre les surcharges lentes (contact auxiliaire du relais thermique) ;
- une boite à boutons poussoirs (marche/arrêt);

- organes de commande (bobine(s) de(s) contacteur(s)).

La source d'alimentation et l'appareillage du circuit de commande ne sont pas nécessairement celle du circuit de puissance. Elle dépend des caractéristiques de la bobine.

IX-3- Démarrage direct

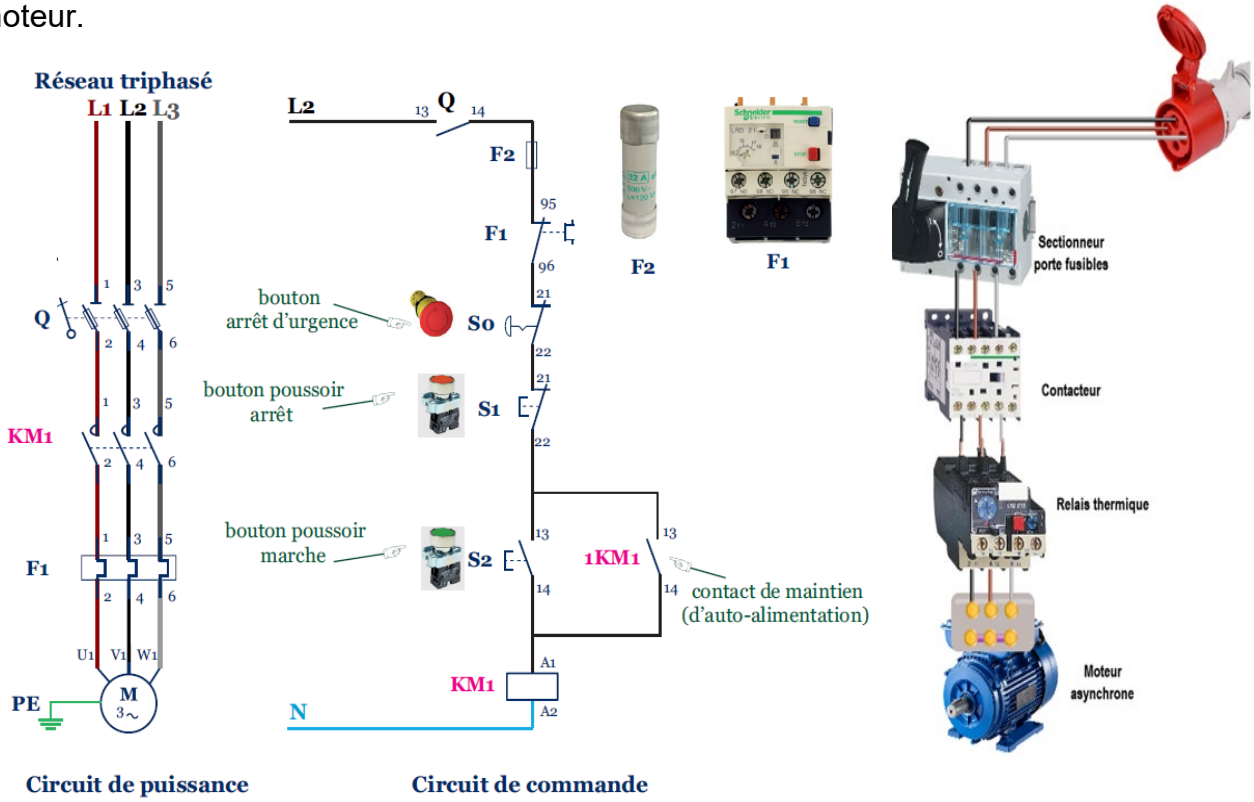
IX-3-1- Principe

Dans ce procédé de démarrage, le moteur asynchrone est branché directement au réseau d'alimentation. Le démarrage s'effectue en un seul temps. Le courant de démarrage peut atteindre 4 à 8 fois le courant nominal du moteur. Le couple de décollage (démarrage) est important. Il peut atteindre 1,5 fois le couple nominal.
Ce procédé de démarrage est adapté aux moteurs de faible puissance (moins de 3KW pour U = 230V et moins de 5,5KW pour U = 400V).

IX-3-2- Démarrage direct à un seul sens de marche.

a- Schéma du circuit de puissance et du circuit de commande.

On veut démarrer un moteur asynchrone triphasé dans un seul sens de marche : L'action sur le bouton poussoir $\mathbf{S_2}$ assure la rotation du moteur.
L'action sur le bouton poussoir $\mathbf{S_1}$ ou sur le bouton d'arrêt d'urgence $\mathbf{S_0}$ assure l'arrêt du moteur.



Figure

Légende pour le circuit de commande						
F2	F1	S0	S1	S2	1KM1	KM1
Fusible de protection	Contact de réarmement	Bouton d'arrêt d'urgence	Bouton poussoir « arrêt »	Bouton poussoir « marche »	Contact de maintien	Bobine du contacteur

b- Fonctionnement

Pour assurer l'alimentation en courant du circuit de commande, il faut fermer manuellement le sectionneur porte fusibles en premier lieu.

L'action sur le bouton marche $\mathbf{S_2}$, entraine simultanément :
- La fermeture des contacts principaux du contacteur $\mathbf{KM_1}$, assurant ainsi l'alimentation des enroulements statoriques du moteur.

- La fermeture du contact auxiliaire **$1KM_1$**. La bobine du contacteur **KM_1** reste alors auto alimentée grâce à son contact auxiliaire **$1KM_1$** (contact de maintien) même si le bouton marche **S_2** est relâché.

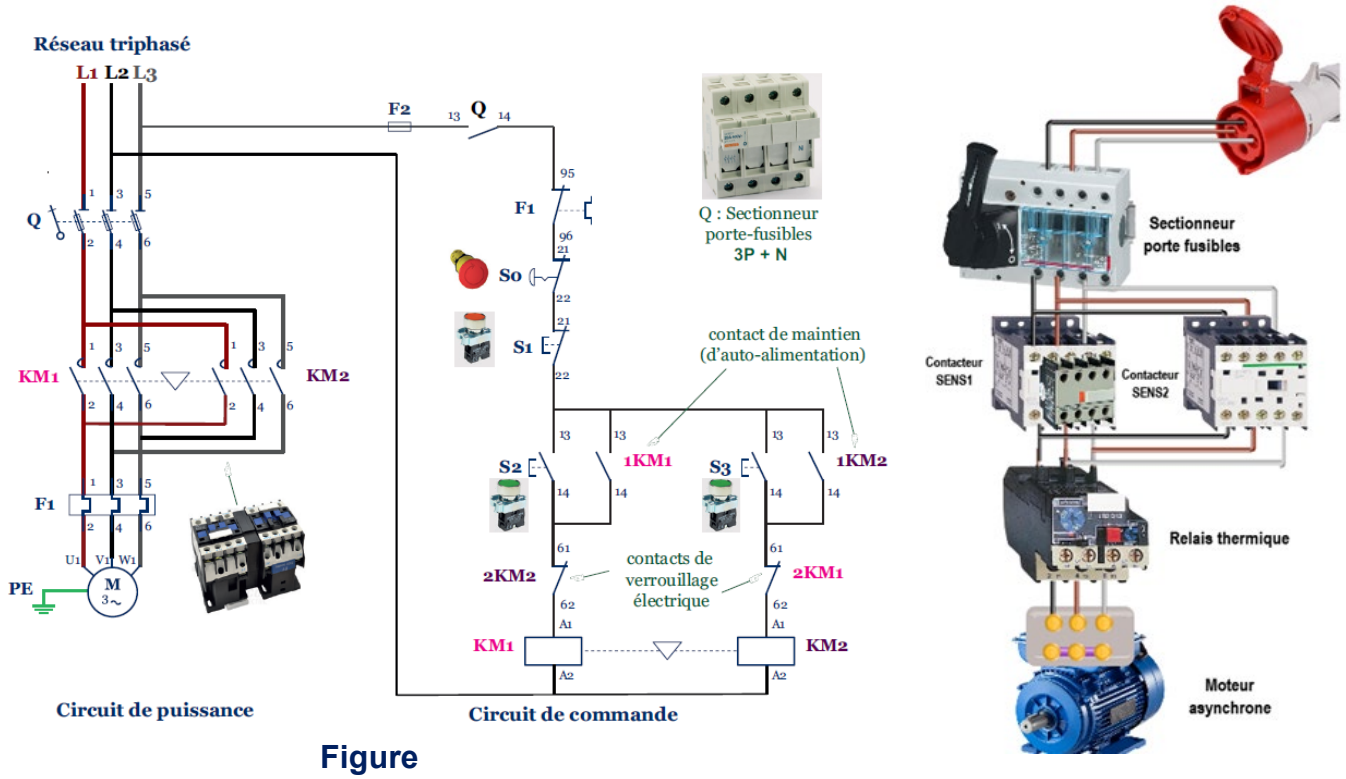
Pour couper l'alimentation, il suffit d'actionner le bouton d'arrêt **S_1** ou le bouton d'arrêt d'urgence **S_0**.

Remarque : L'action simultanée sur **S_1** et **S_2** maintient le moteur à l'arrêt (fonction mémoire à arrêt prioritaire).

IX-3-3- Démarrage direct à deux sens de marche.

a- Schéma du circuit de puissance et du circuit de commande

On veut démarrer un moteur asynchrone triphasé dans deux sens de marche :
L'action sur le bouton poussoir **S_2** assure la rotation du moteur dans le sens 1.
L'action sur le bouton poussoir **S_3** assure la rotation du moteur dans le sens 2.
L'action sur le bouton poussoir **S_1** ou sur le bouton d'arrêt d'urgence **S_0** assure l'arrêt du moteur.



Figure

Légende pour le circuit de commande						
F2	**F1**	**S0**	**S1**	**S2**	**S3**	**KM1**
Fusible de protection	Contact de réarmement	Bouton d'arrêt d'urgence	Bouton poussoir « arrêt »	Bouton poussoir « marche » Sens1	Bouton poussoir « marche » Sens 2	Bobine du contacteur KM1
KM2	**1KM1**	**1KM2**	**2KM1**	**2KM2**		
Bobine du contacteur KM2	Contact de maintien du contacteur KM1	Contact de maintien du contacteur KM2	Contacts de verrouillages électriques			

b- Fonctionnement

L'action sur l'un ou l'autre des boutons poussoir marche (**S_2** ou **S_3**) entraine simultanément :
- La fermeture des contacts principaux des contacteurs **KM_1** ou **KM_2** pour alimenter le stator et le moteur tourne dans un sens 1 ou dans le sens 2.
- La fermeture du contact d'auto-alimentation (**$1KM_1$** ou **$1KM_2$**).
- L'ouverture du contact de verrouillage électrique (**$2KM_1$** ou **$2KM_2$**), empêchant ainsi l'excitation simultanée des deux bobines **KM_1** et **KM_2**.

L'action sur **S_1** ou **S_0** entraine l'arrêt du moteur.

Remarques :

- Pour passer d'un sens à un autre, il faut passer obligatoirement par l'arrêt.

- Un verrouillage mécanique est nécessaire pour éviter le court-circuit entre les deux phases en cas où les contacteurs **KM_1** et **KM_2** seraient fermés ensemble.

- Un verrouillage électrique par les contacts auxiliaires **$2KM_1$** et **$2KM_2$** permet de compléter le verrouillage mécanique dans le cas où ce dernier serait défaillant.

IX-4- Limitation du courant de démarrage

Contrairement au démarrage direct, le démarrage des moteurs moyennes et fortes puissances nécessite l'utilisation de procédés de limitation de courant de démarrage tout en maintenant les performances mécaniques de l'ensemble « moteur-machine entraînée ». Il existe deux types d'actions :

- Action sur le stator : Consiste à réduire la tension aux bornes des enroulements statoriques. On peut réaliser le démarrage par :

→ Couplage étoile-triangle,

→ Elimination des résistances statoriques,

→ Utilisation d'un auto-transformateur.

Ce type d'action est utilisé pour les moteurs moyennes puissances.

- Action sur le rotor : Consiste à augmenter la résistance rotorique au démarrage.

On peut réaliser le démarrage par:

→ Elimination des résistances rotoriques,

→ Utilisation des moteurs à cages multiples …

Ce procédé de démarrage est accompagné en plus de la réduction du courant de démarrage, d'une augmentation du couple de démarrage. Ce type de démarrage est utilisé pour les moteurs fortes puissances.

On s'intéresse uniquement au démarrage étoile triangle pour limiter le courant de démarrage.

IX-5- Démarrage étoile-triangle à un seul sens de marche :

IX-5-1- Principe.

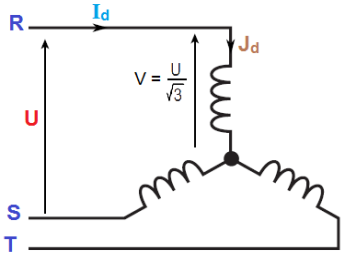
Ce type de démarrage est utilisé pour les moteurs **à couplage** triangle lors de leur fonctionnement normal.

Exemple : Un moteur 400V/690V sur un réseau 230V/400V

Le démarrage s'effectue en deux temps :

- **1er temps** : couplage étoile (Y)

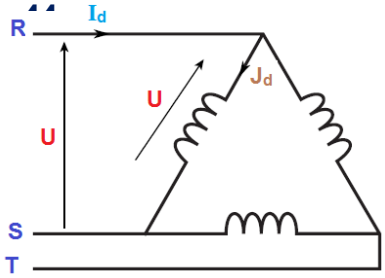
Chaque enroulement du stator est alimenté sous une tension réduite.



Figure

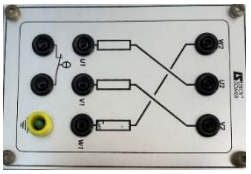
2ème temps : couplage triangle (Δ)

Grâce à une temporisation réglable, au couplage étoile est substitué le couplage triangle. Chaque enroulement du stator est alimenté par sa tension nominale.



Figure

Remarque : Le démarrage étoile triangle ne peut s'appliquer qu'aux moteurs dont les six extrémités des enroulements sont sorties sur la plaque à bornes, et dont le couplage triangle correspond à la tension du réseau.



Figure

IX-5-2- Schémas du circuit de puissance et du circuit de commande

On veut démarrer en étoile triangle un moteur asynchrone triphasé dans un seul sens de rotation :

L'action sur le bouton poussoir S_2 assure la rotation du moteur.

L'action sur le bouton poussoir S_1 ou sur le bouton d'arrêt d'urgence S_0 assure l'arrêt du moteur.

Ce moteur fonctionne en deux temps (en étoile puis en triangle).

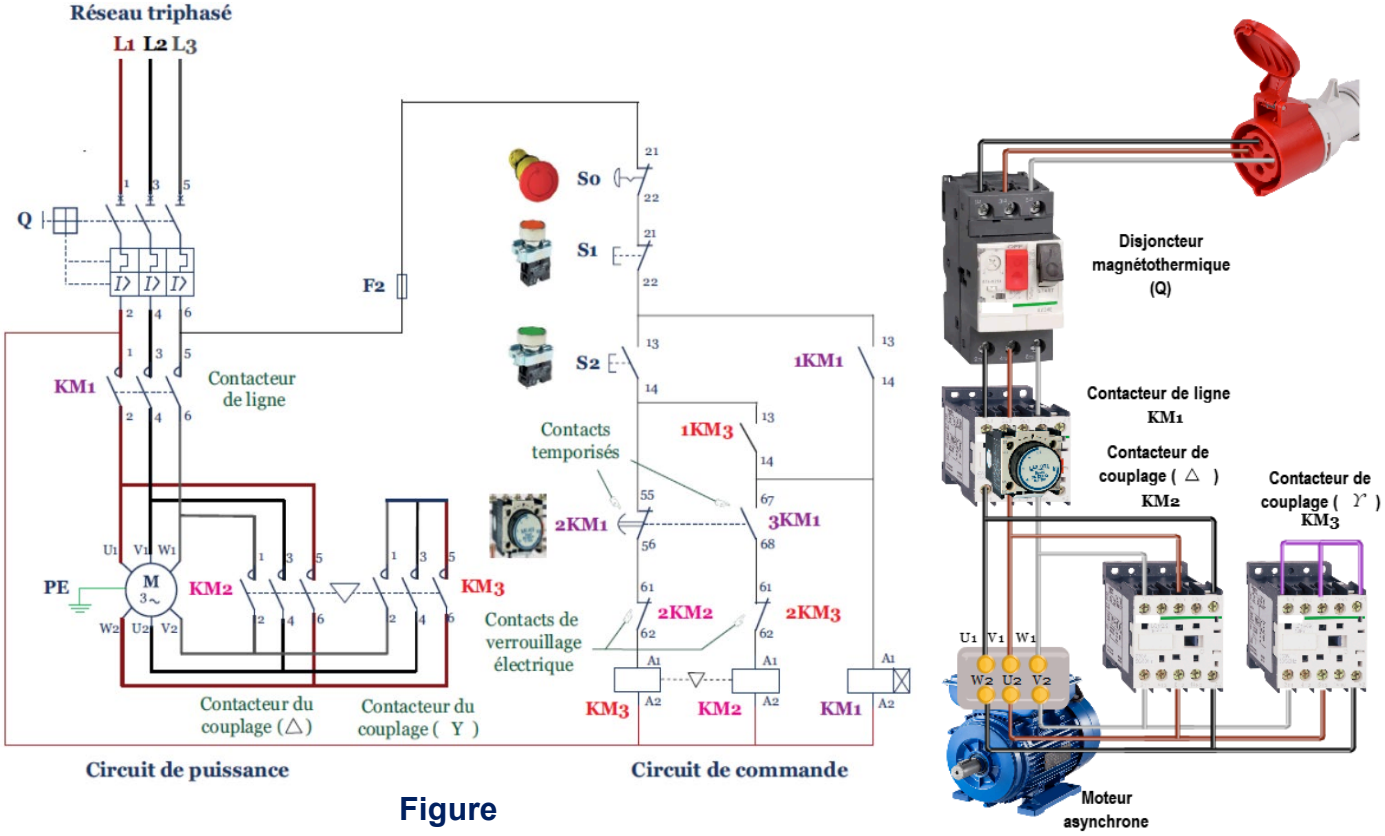


Figure 17

Légende pour le circuit de commande							
F2	F1	S0	S1	S2	KM1	KM2	
Fusible de protection	Contact de réarmement	Bouton d'arrêt d'urgence	Bouton poussoir « arrêt »	Bouton poussoir « marche »	Bobine du contacteur de ligne	Bobine du contacteur « couplage triangle »	
KM3		1KM1	2KM2	2KM3	1KM3	2KM1	3KM1
Bobine du contacteur « couplage étoile »		Contact d'auto-alimentation	Contacts de verrouillages électriques		Contact d'auto-alimentation	Contacts temporisés	

IX-5-3- Fonctionnement

1er temps :

Une impulsion sur le bouton "S_2" provoque l'excitation de la bobine du contacteur du couplage étoile "KM_3" qui ferme son contact de maintien "$1KM_3$" pour alimenter la bobine du contacteur de ligne "KM_1". Cette dernière, ferme son contact "$1KM_1$" assurant ainsi le maintien de son alimentation et celle de la bobine "KM_3" une fois le bouton "S_2" est relâché.

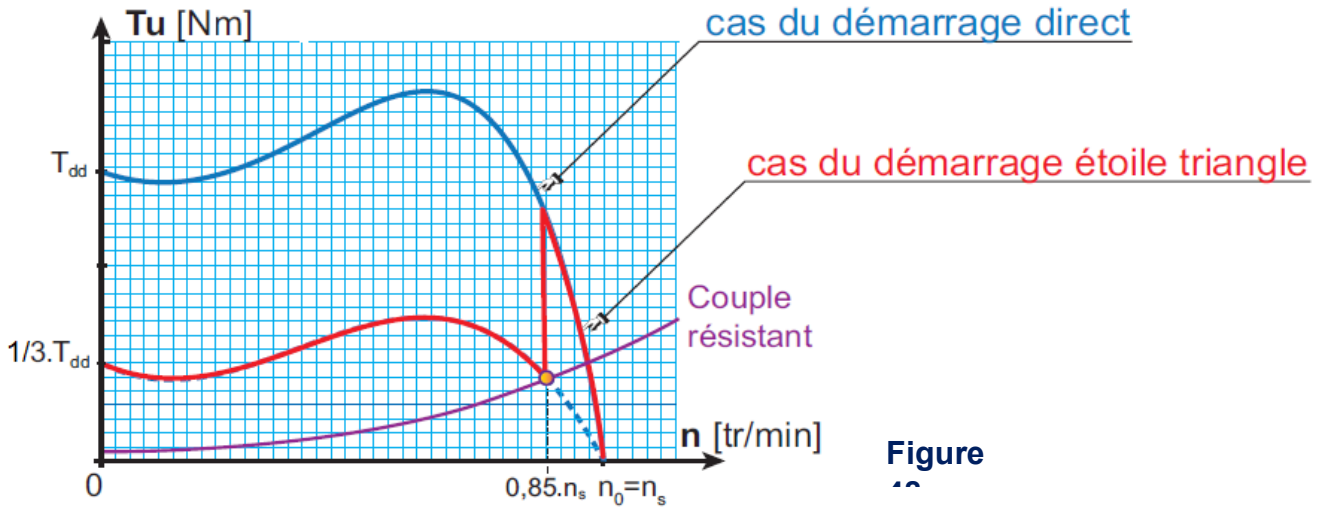
2ème temps :

Au bout de **3** à **5** secondes, les contacts temporisés "$2KM_1$" et "$3KM_1$" actionnés par KM_1 entraînent la désexcitation de la bobine "KM_3" et l'excitation de la bobine du contacteur du couplage triangle "KM_2".

L'action sur le bouton poussoir S_1 ou sur le bouton d'arrêt d'urgence S_0 assure l'arrêt du moteur.

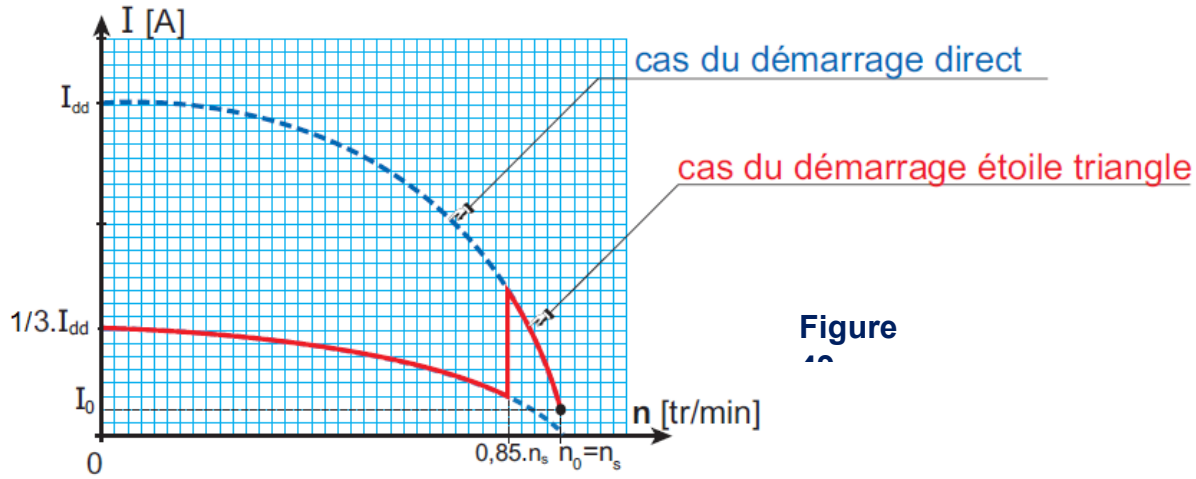
IX-5-4- Caractéristiques

a- Caractéristique mécanique Tu = f(n)



Figure

b- Caractéristique électromécanique I = f(n)



Figure

IX-5-5- Avantages et inconvénients du démarrage étoile-triangle

Lors d'un démarrage étoile-triangle, le moteur est d'abord connecté au réseau avec un couplage étoile, puis une fois démarré, on passe au couplage triangle.
Le fait de démarrer avec un couplage étoile permet de diviser par $\sqrt{3}$ la tension appliquée au

moteur.

a- Avantages

- Le courant de démarrage (I_d) absorbé est trois fois plus faible que lors d'un démarrage direct avec un couplage triangle ($Id = \frac{Idd}{3}$).

- Faible complication d'appareillages : l'installation est réalisée simplement à l'aide de contacteurs, cette méthode de démarrage est très économique.

b- Inconvénients

- Le couple de démarrage (T_d) est lui aussi trois fois plus faible que lors d'un démarrage en triangle ($Td = \frac{Tdd}{3}$).

- Coupure du courant lors du passage du couplage étoile en couplage triangle d'où l'apparition des phénomènes transitoires.

c- Emplois.

Machines à bois, machines démarrant à vide, machines-outils ….